



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации Федеральное
государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»



Институт ядерной физики и технологий
Кафедра физики элементарных частиц №40

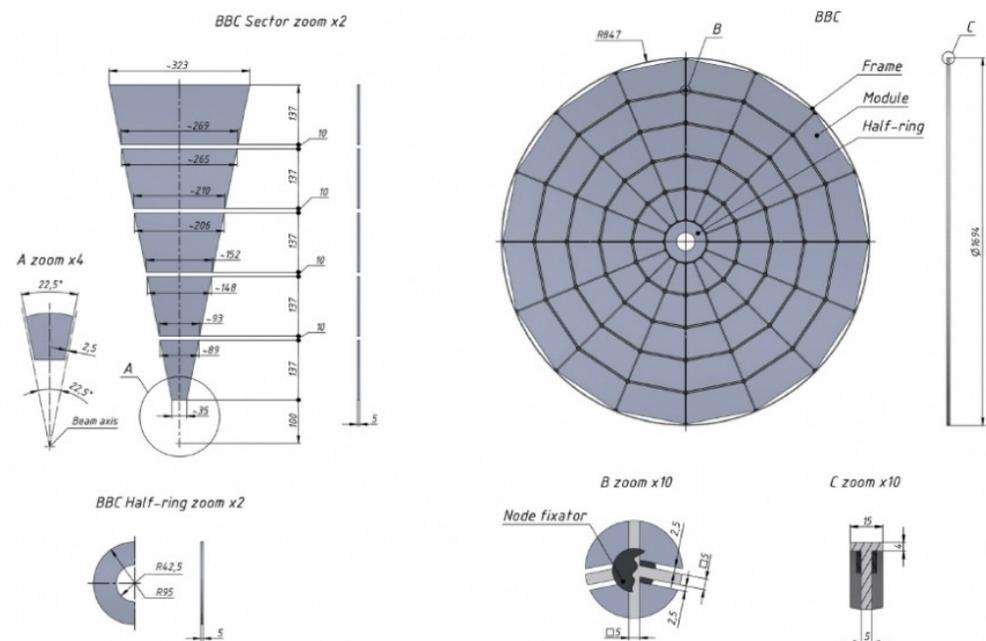
Выпускная квалификационная работа
магистра на тему:

Модель прототипа детектора Beam-Beam Counter эксперимента SPD на NICA

Студент:
Морозихин Александр Николаевич
Группы M22-115

Научный руководитель:
Нигматкулов Григорий Александрович,
доц., к.ф.-м.н.

Детектор BBC // Цели



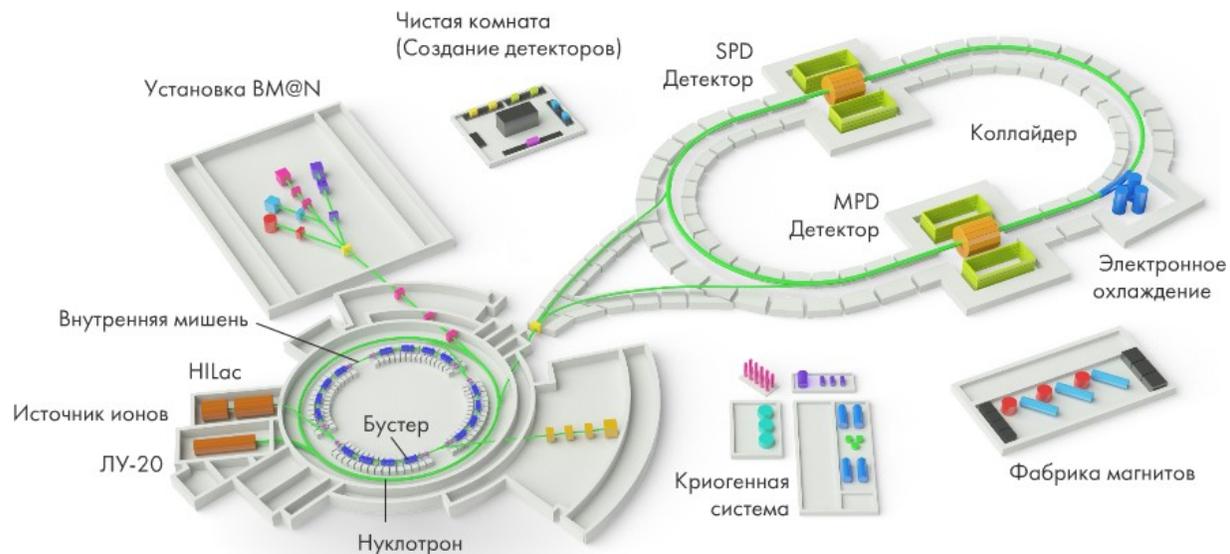
- измерение локальной поляриметрии, на основе измерений азимутальных асимметрии
- измерение t_0 - момента столкновения пучков
- введение ионной программы измерений на детекторе SPD

Для ионной программы можно выделить следующие задачи:

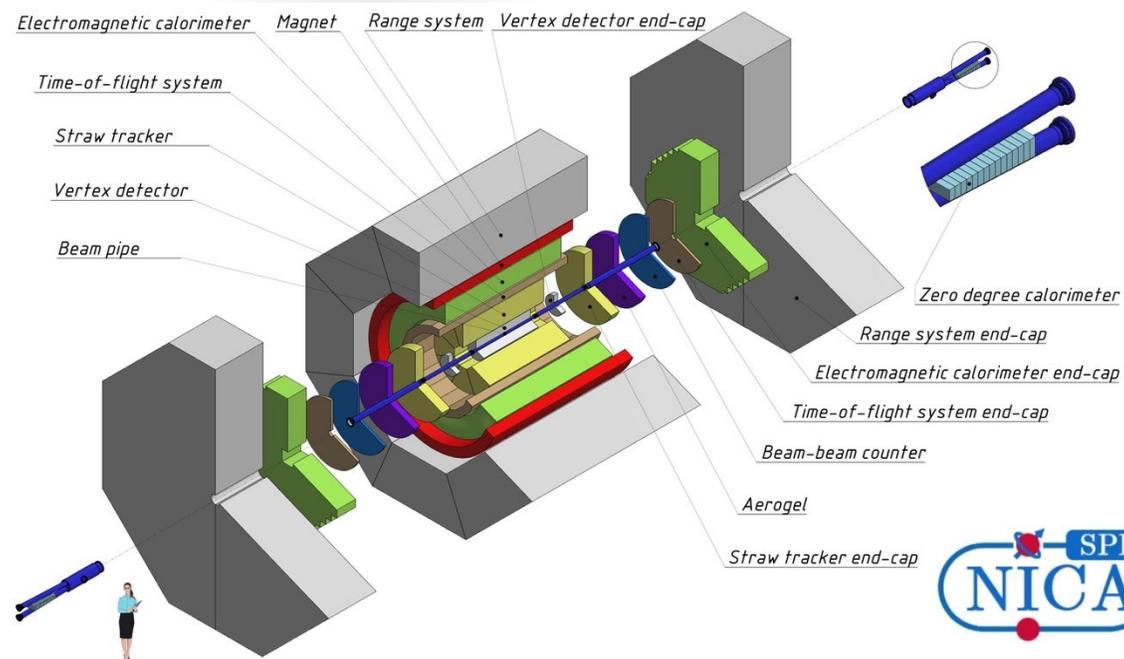
- оценка центральности столкновений
- восстановление плоскости реакции

Экспериментальный комплекс NICA. Детектор SPD

Экспериментальный комплекс

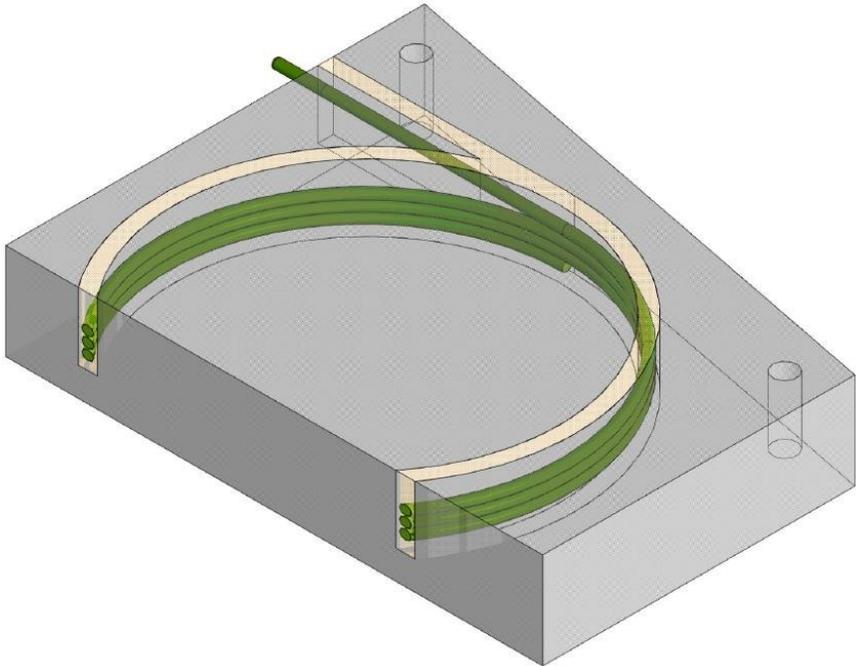


Детектор SPD

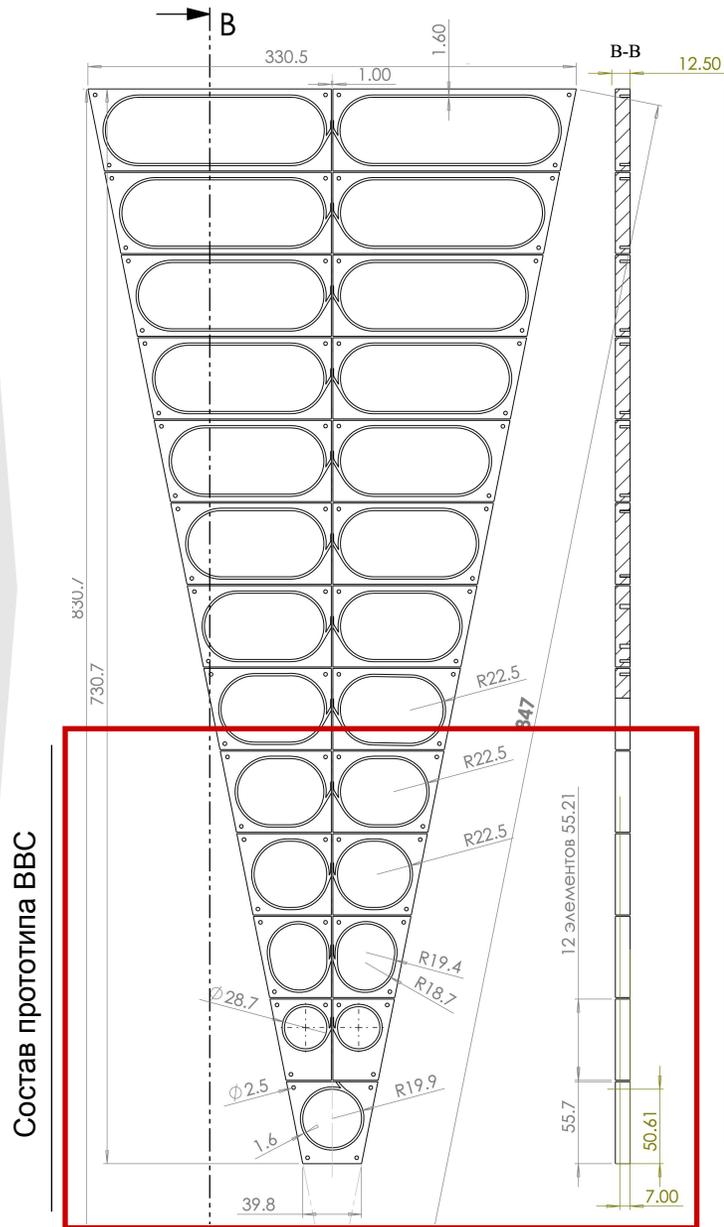


Цель работы:

- Разработка модели прототипа детектора BBC в пакете GEANT4

**Задачи:**

- Расчет количества фотонов, генерируемых при прохождении заряженной частицы через элемент детектора BBC
- Расчет количества и энергетического спектра сцинтилляционных фотонов на выходе из ячейки детектора BBC
- Оптимизация геометрии элементов детектора

Концепт сектора BBC

Для прототипа детектора выбраны следующие параметры геометрии:

- Толщина элементов: 10 мм
- Глубина канала для оптоволокон: 7 мм
- Оптоволокно: Kuraray Y-11 зеленый

В рамках задачи оптимизации необходимо определить:

- Количество витков спектросмещающего волокна
- Форма каналов для спектросмещающего волокна

Этапы реализации

1
Определение пакета физических процессов и материалов:*С примитивной геометрией***Пакеты**

- FTFP_BERT
- EM_option4
- **Optical Physics**

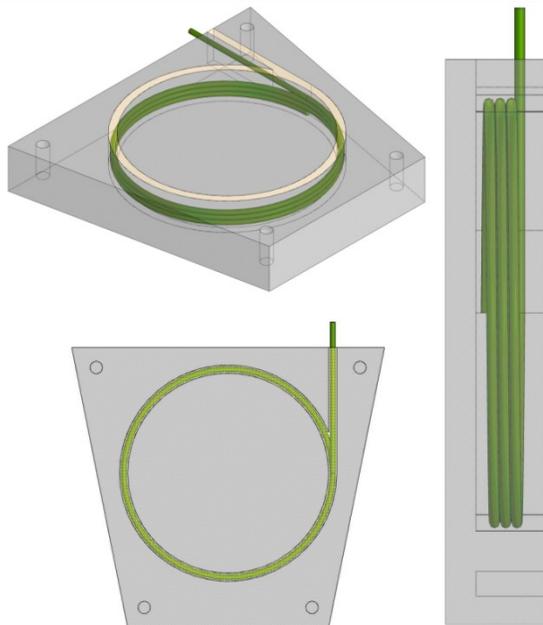
Оптика

- Сцинтилляция
- Черенков
- WLS
- Поглощение
- Отражения
- Рэлеевское рассеяние

Материалы

Полистерол - материал для детектора
Оргстекло и полистерол – материал для оптоволокон
Оптический клей

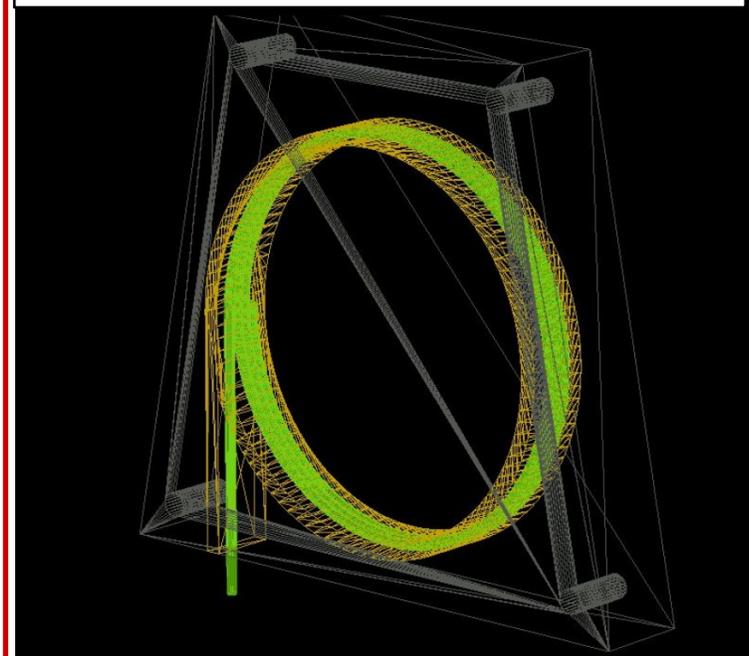
1

2
Описание геометрии:*3D – модель одного элемента детектора (КОМПАС-3D)*

2

3
Перенос в Geant4:

- STL -> CADMesh
- STEP -> GDML



3

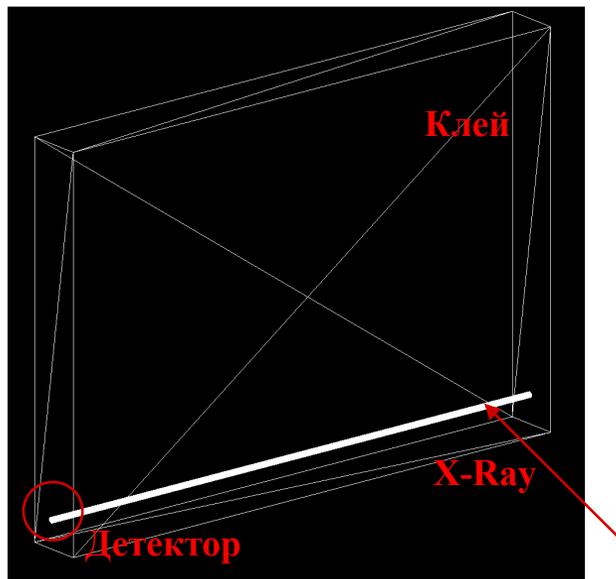
Дополнительный слайд - 1*4**
Результаты моделирования:

- распределение по множественности генерируемых фотонов от различных процессов в объеме детектора;
- энергетические спектры;
- распределение по числу зарегистрированных фотонов;

4

Описание

Визуализация конфигурации для сравнения методов описания геометрии



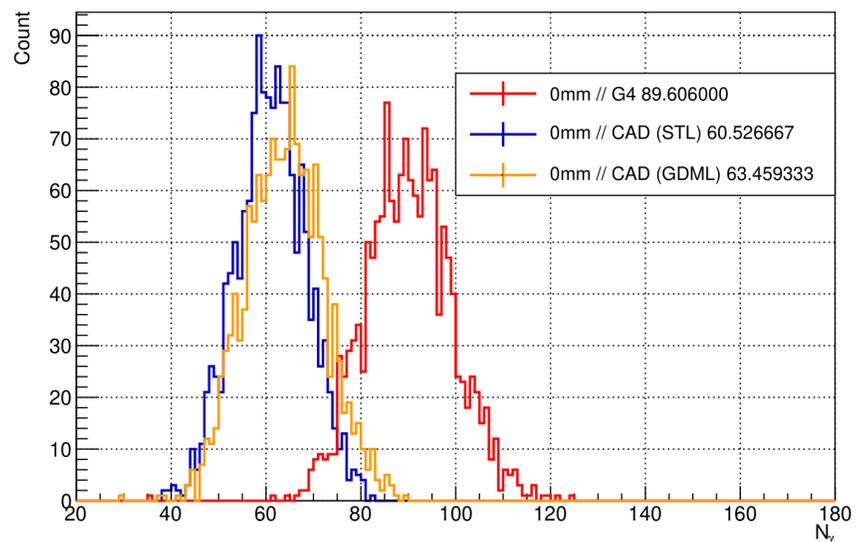
D: 0 - прямая;

Конфигурации прямых отрезков оптоволокон:

- Геометрия через G4Tubs
- CAD -> STL -> CADMesh
- CAD -> STEP -> GDML -> G4Parser

Результаты

Распределение по числу фотонов, попавших на чувствительный объем (REG)



Два метода переноса геометрии STL -> G4 (CADMesh) и STEP/STL -> GDML -> G4Parser используют тесселяцию. Из-за отклонения геометрии от окружности при таких подходах WLS фотоны не удерживаются оптоволоконном.

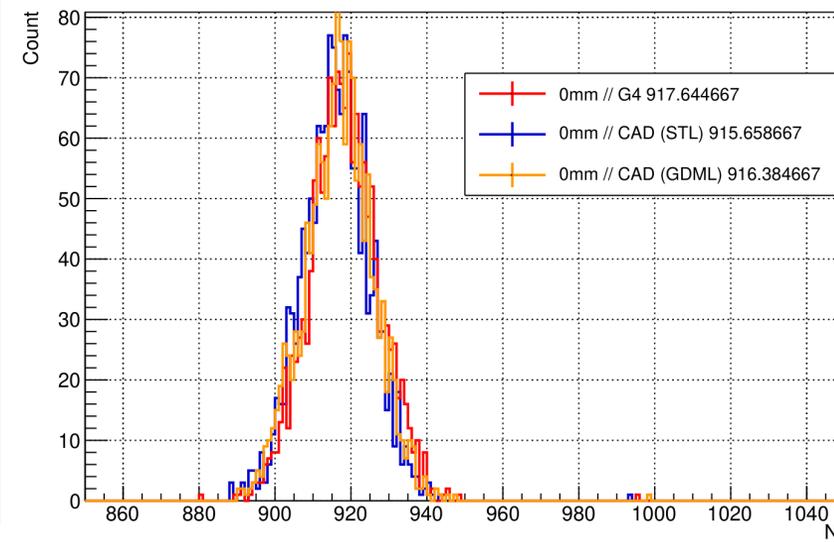
**Подробное описание: Дополнительный слайд - 2, 3*

Выводы

- При сравнении идентичных элементов оптоволоконна (**G4 vs CAD**) установлено: есть **отклонение ~30%** по числу регистрируемых фотонов
- Количество генерируемых **WLS** фотонов **не зависит** от метода описания геометрии
- Для описания геометрии основным методом выбран **STL -> G4 (CADMesh)**

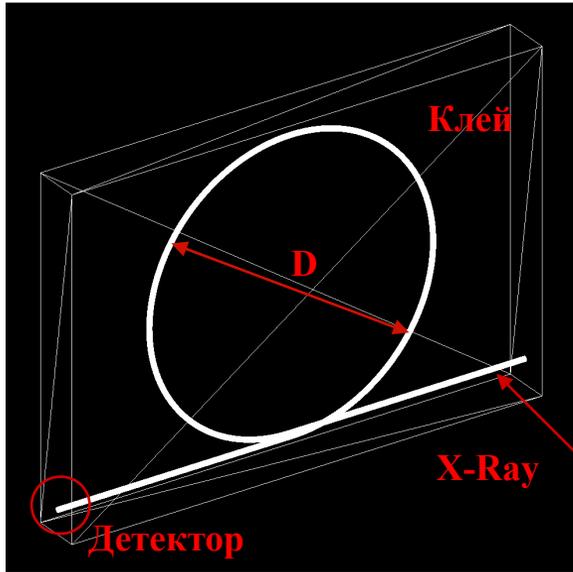
[*Gamma, 3.6 eV, 1500 evt*]

Распределение по числу фотонов, переизлученных в объеме спектросмещающего волокна (WLS)



Описание

Визуализация конфигурации для измерения зависимости потерь от кривизны

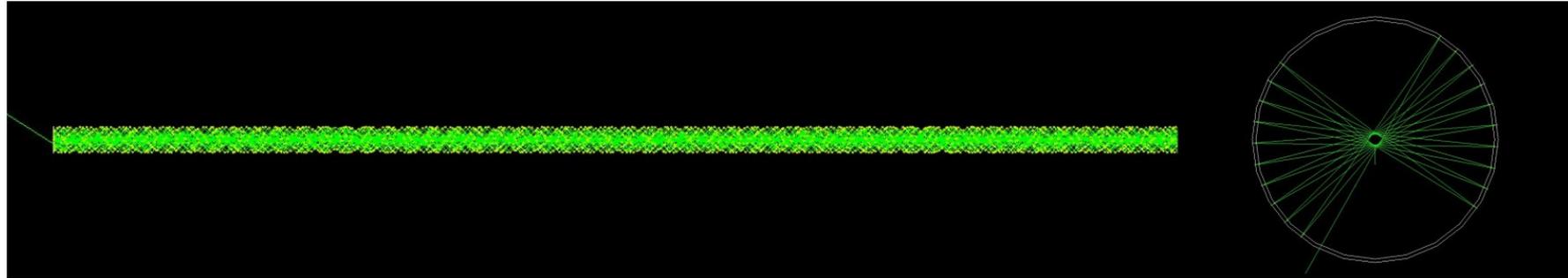


D: 0 - прямая; 20; 30; 40; 50; 60 мм

- Объем из клея с характеристиками, используемыми в моделировании
- На фиксированном расстоянии от детектора в направлении спектросмещающего волокна направляется пучок из 1000 фотонов с энергией 3.6 эВ
- Набор из нескольких витков с разными диаметрами

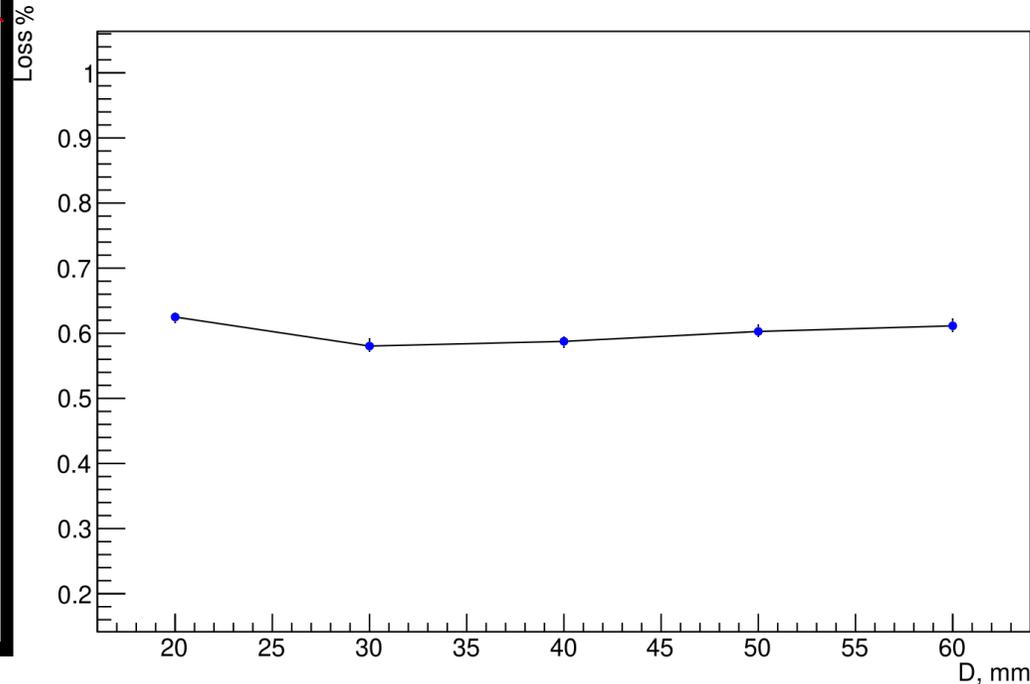
Результаты

Визуализация работы спектросмещающего волокна в GEANT4



[Gamma, 3.6 eV, 1000 evt]

График зависимости потерь света от диаметра витка

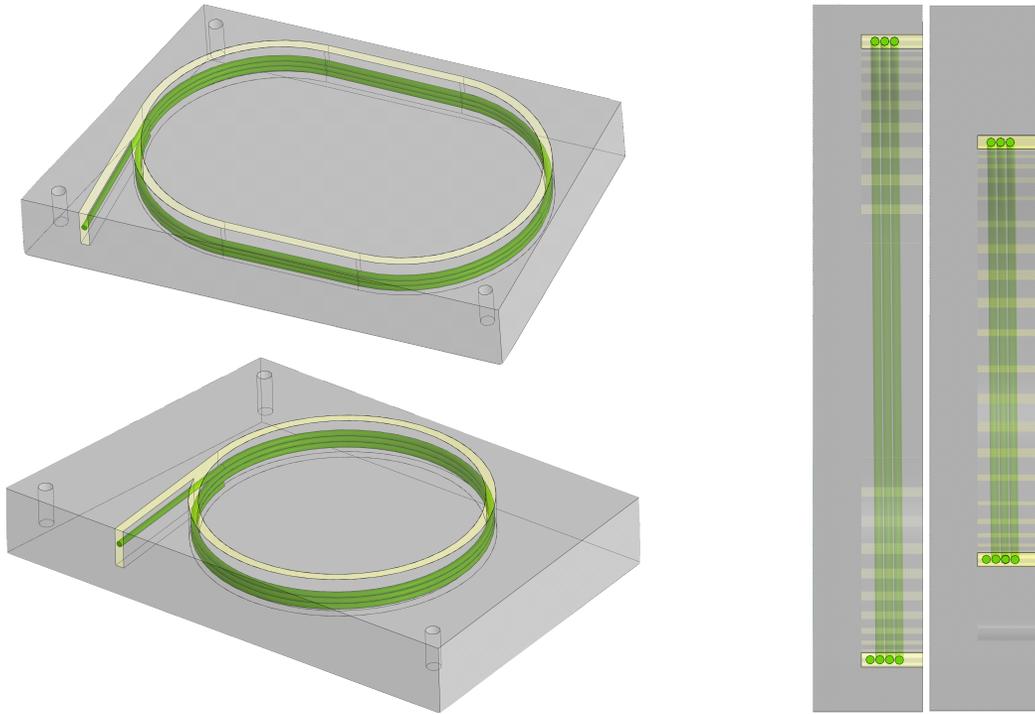


Выводы

- Нет зависимости потерь от радиуса кривизны при моделировании в G4 (при описании геометрии с помощью КОМПАС-3D и библиотеки CADMesh)
- В качестве метрики для оценки эффективности конфигураций выбрано число фотонов переизлучаемых в объеме спектросмещающего волокна (WLS)

Описание

Визуализация четвертого элемента прототипа BBC в GEANT4. Две конфигурации с разными формами каналов



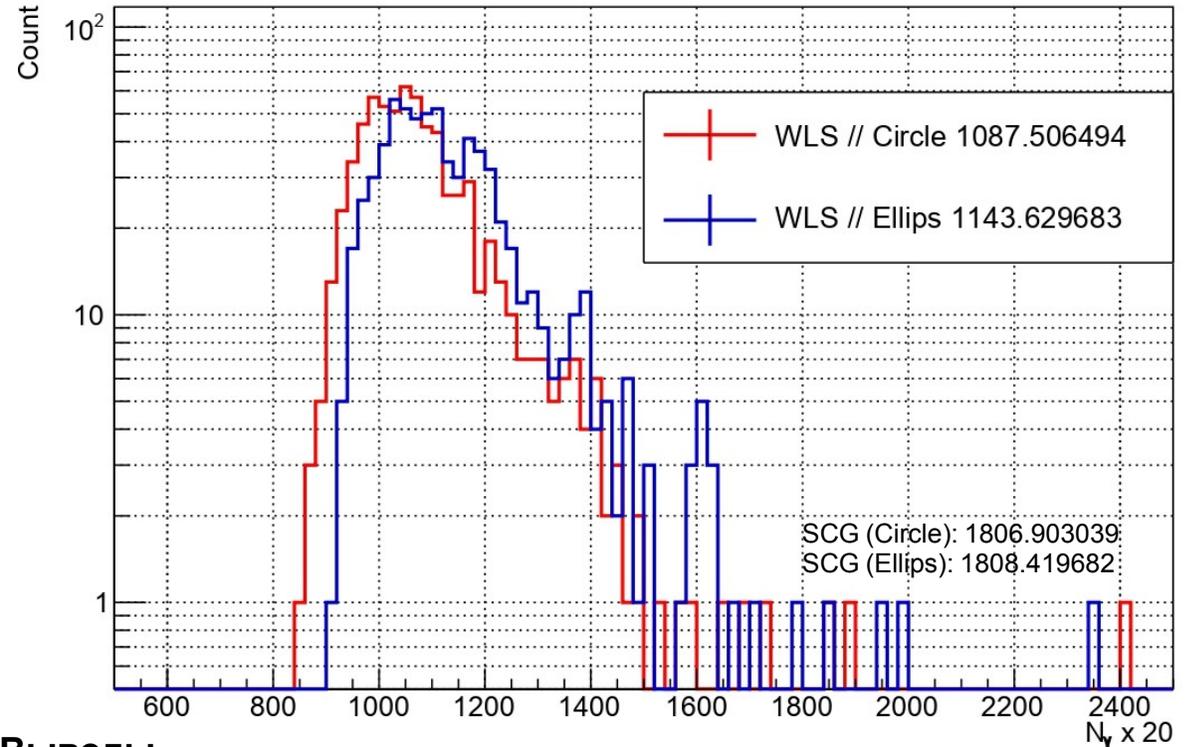
- Две конфигурации укладки оптоволокна: три витка по траектории в виде эллипса и окружности
- Глубина канавки: 7 мм
- В качестве первичной частицы выбран протон с энергией 700 МэВ, пучок направлен перпендикулярно элементу, в случайную точку на его поверхности

*Дополнительный слайд - 4, 5

Результаты

[p, 700 MeV, 1000 evt]

Распределение по числу фотонов, переизлучаемых в объеме спектросмещающего волокна (WLS)

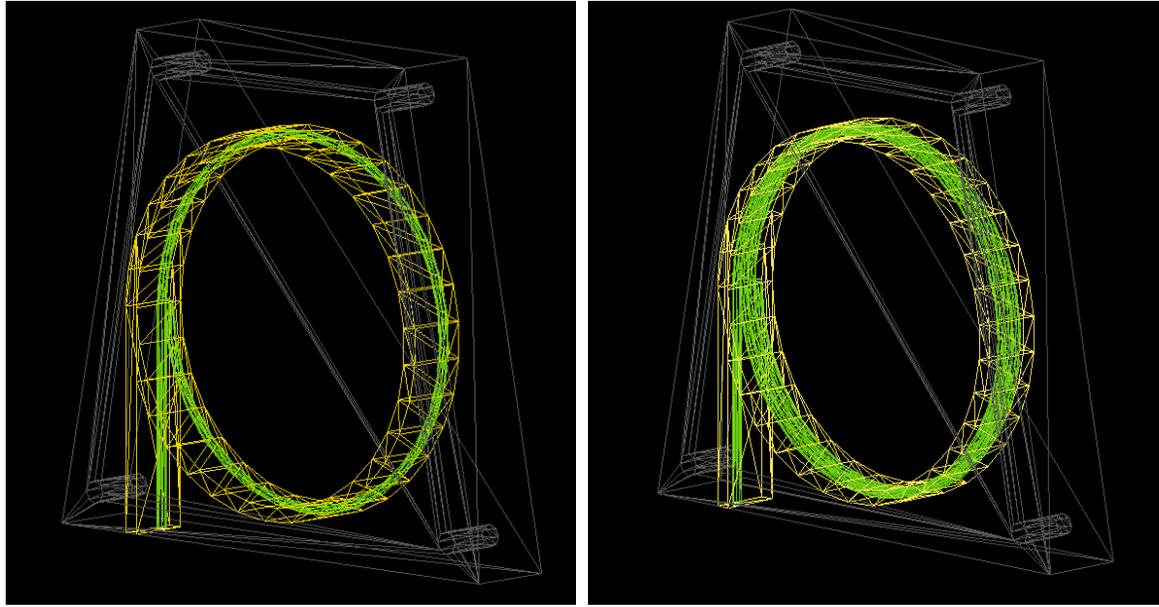


Выводы

- Конфигурация с эллиптическим каналом **эффективнее** кругового канала на **5%**
- Контур канала для спектросмещающего волокна должен покрывать наибольшую площадь

Описание

Визуализация нулевого элемента прототипа BBC в GEANT4. Слева конфигурация с одним витком, справа с тремя витками



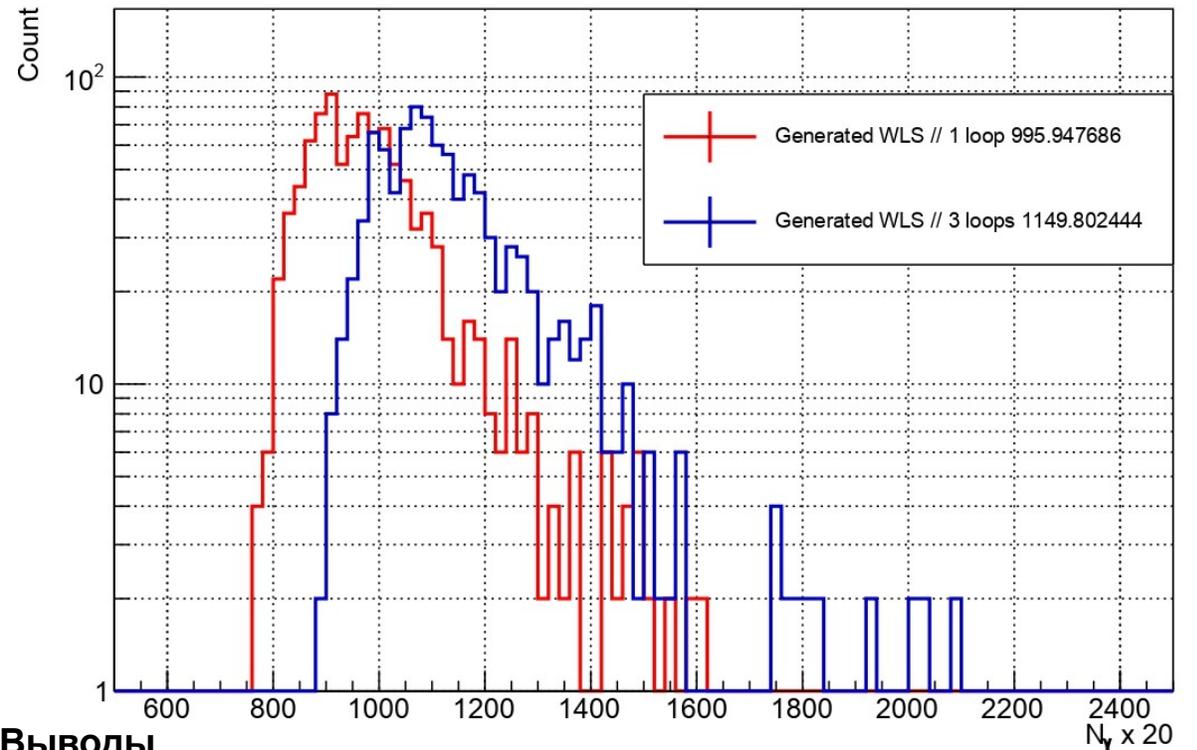
- Две конфигурации спектросмещающего волокна: три витка и один виток
- Виток оптоволокну начинается на расстоянии 1 мм от дна канала
- Глубина канала: 7 мм
- В качестве первичной частицы выбран протон с энергией 700 МэВ, пучок направлен перпендикулярно элементу, в случайную точку на его поверхности

*Дополнительный слайд - 4, 5

Результаты

[p, 700 MeV, 1000 evt]

Распределение по числу фотонов, переизлучаемых в объеме спектросмещающего волокна (WLS)

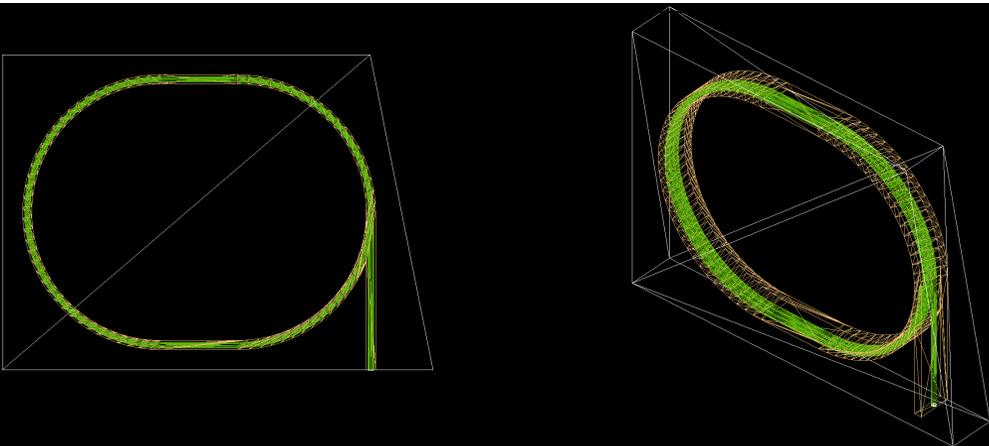


Выводы

- Конфигурация из 3 витков **эффективнее** 1 витка на **9.5%**
- Около **70%** генерируемых SC фотонов переизлучается в оптоволокну (**1 виток**)
- Около **80%** генерируемых SC фотонов попадает и переизлучается в спектросмещающем волокне (**3 витка**)

Описание

Визуализация четвертого элемента прототипа BBC в GEANT4



- Каждый элемент прототипа смоделирован в КОМПАС-3D, перенесен в G4 с помощью библиотеки CADMesh
- Для моделирования использовалась геометрия, приближенная к реальной

Таблица соотношения числа генерируемых фотонов для всех элементов прототипа BBC

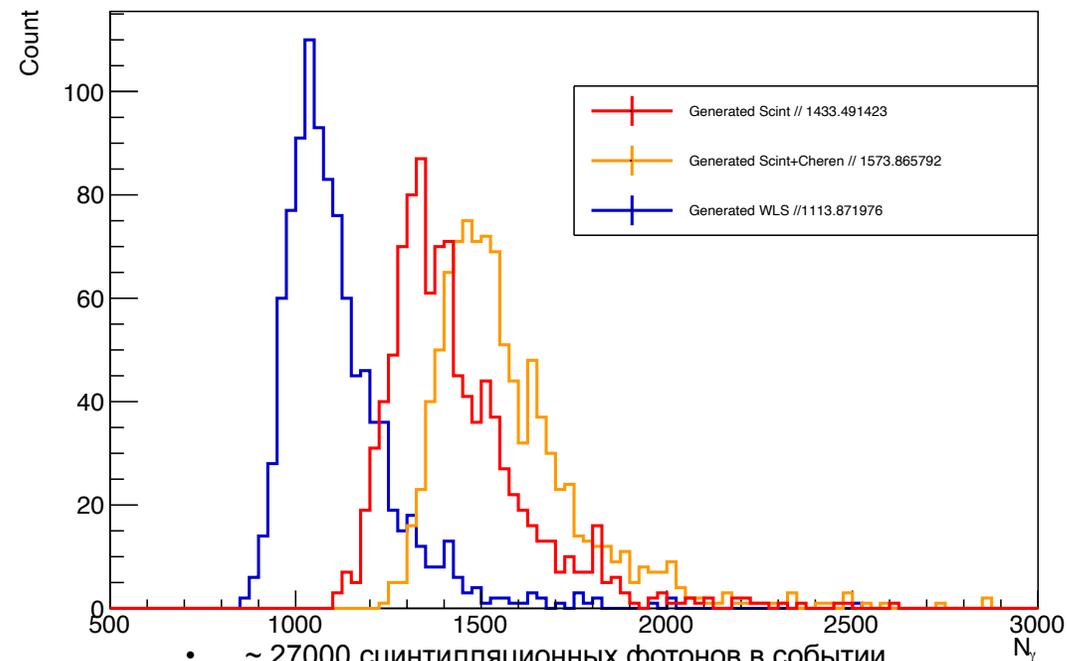
Номер тайла	Число SC	Число WLS	Соотношение
0	1438.673	1165.325	0.81
1	1448.454	1174.393	0.81
2	1437.933	1151.716	0.80
3	1442.168	1134.404	0.79
4	1433.491	1113.871	0.79

Результаты

[p, 700 MeV, 1000 evt]

Распределение по числу фотонов, генерируемых на разных этапах моделирования (элемент 4)

*Для остальных элементов: Дополнительный слайд - 6, 7, 8



- ~ 27000 сцинтилляционных фотонов в событии
- ~ 140 фотонов Черенковского излучения в событии

Выводы

- Отношение генерируемых SC к CH: 192:1
- Элементы прототипа имеют схожую эффективность

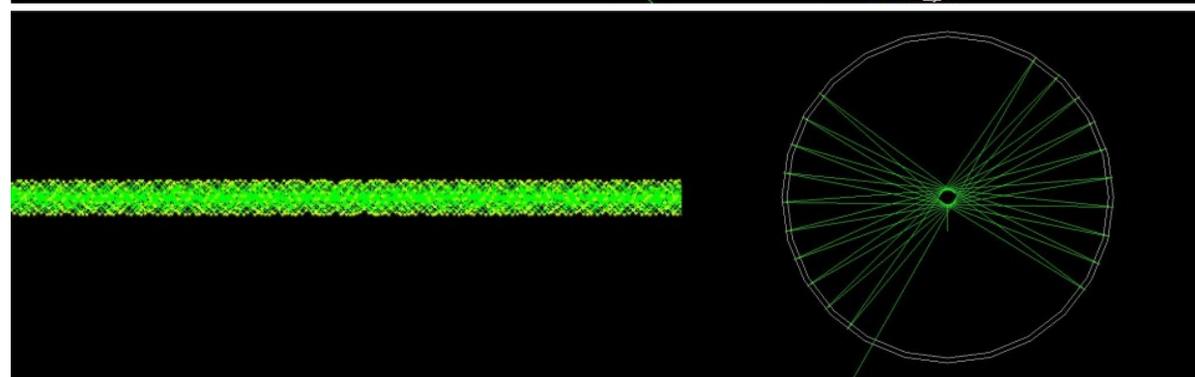
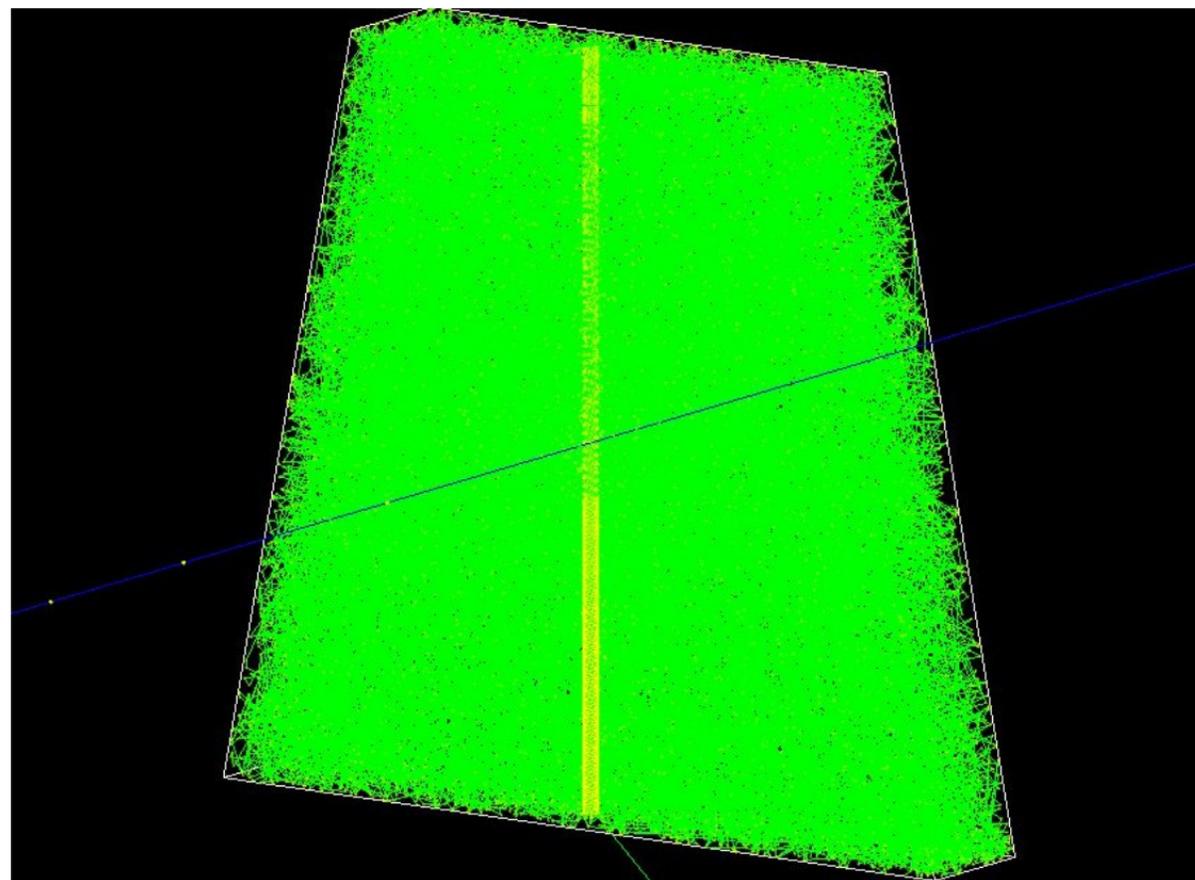
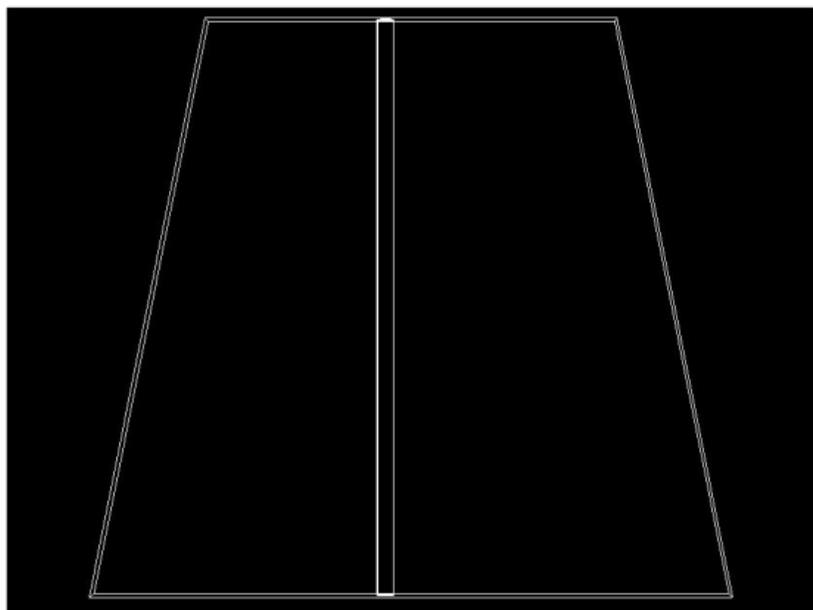
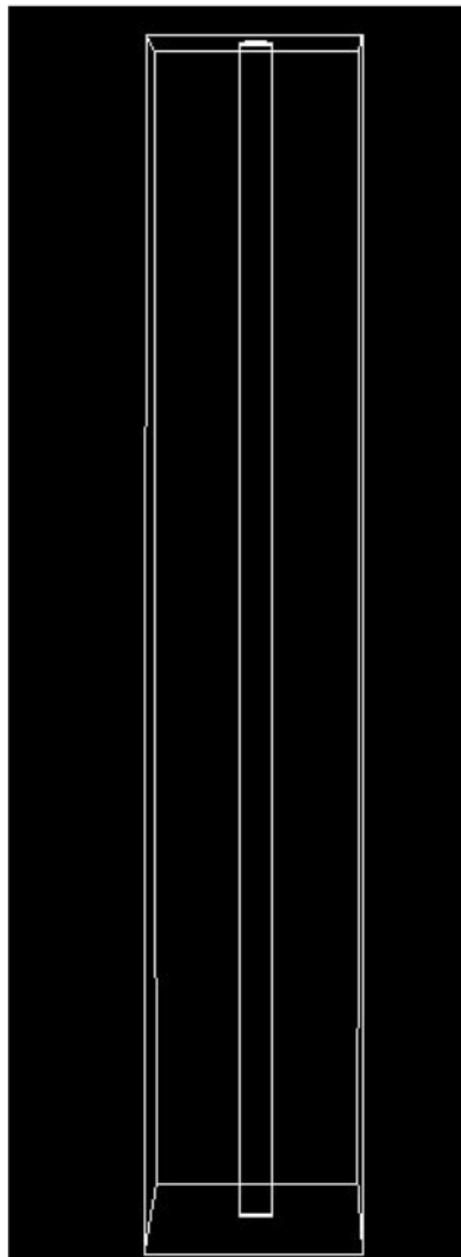
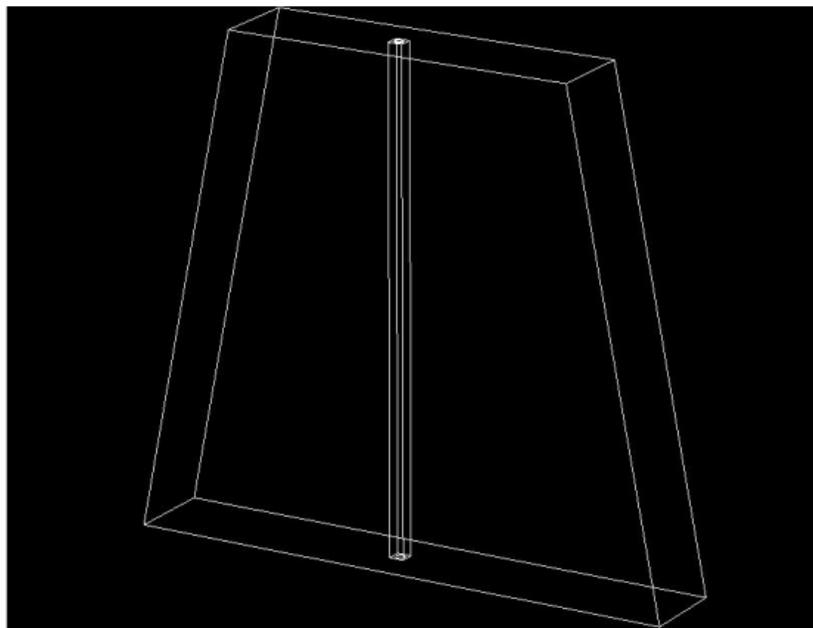
Заклучение по G4 BBC моделированию

- Произведено исследование зависимости потерь света от радиуса кривизны оптоволокна:
 - Отсутствие зависимости **обусловлено точностью определения геометрии** при переносе из CAD в G4;
 - **Не представляется возможным** рассчитать число фотонов на выходе из элемента детектора с описанием точной геометрии формы оптоволокна в G4;
- В рамках оптимизации геометрии произведены исследования:
 - Зависимость числа WLS фотонов от количества витков спектросмещающего волокна;
 - Зависимость числа WLS фотонов от формы канала для размещения спектросмещающего волокна;
 - Также несколько второстепенных исследований: глубина залегания оптоволокна и глубина канала для оптоволокна (дополнительные слайды 4, 5);
- Построена G4 модель для каждого элемента прототипа BBC с использованием реальной геометрии:
 - **Каждый элемент** показывает схожую **эффективность** по числу переизлучаемых фотонов (WLS) в объеме спектросмещающего волокна (**~80%**);

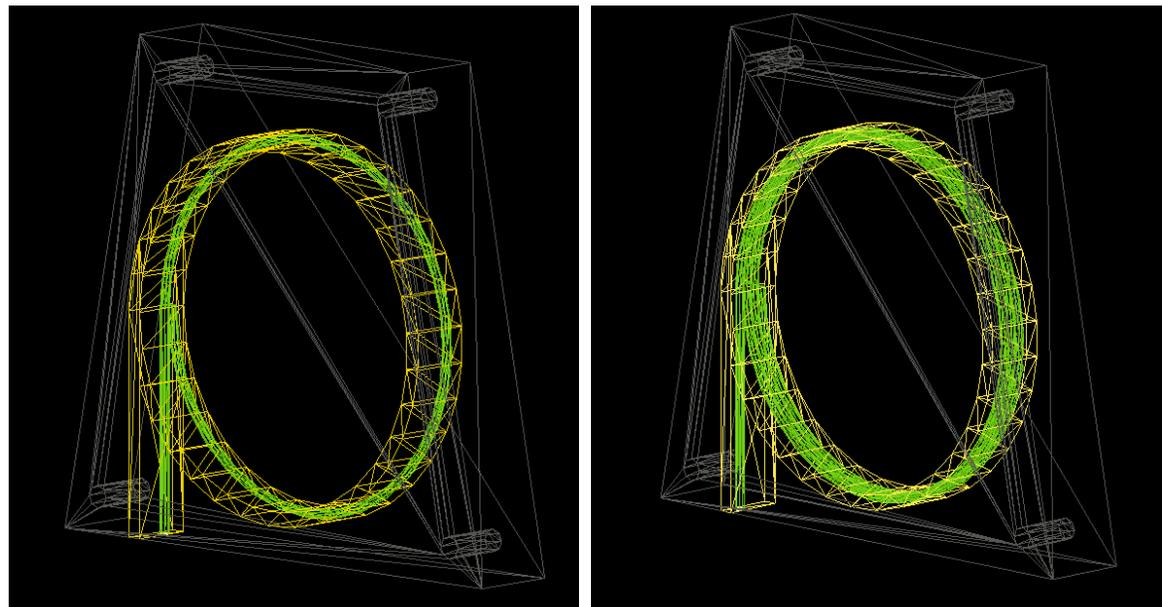
Для дальнейшей работы планируется:

- Построить функцию перевода числа WLS фотонов в количество фотонов на выходе из элемента детектора;
- Сравнить результаты моделирования с экспериментальными данными;

Для этого необходимо произвести серию измерений с реальными элементами прототипа детектора



Описание



- Две конфигурации укладки оптоволокна: три витка и один виток (оба начинаются с отступа в 1 мм от дна канавки)
- Одна конфигурация глубины канавки: 7 мм
- P , 700 МэВ, пучок направлен в центр

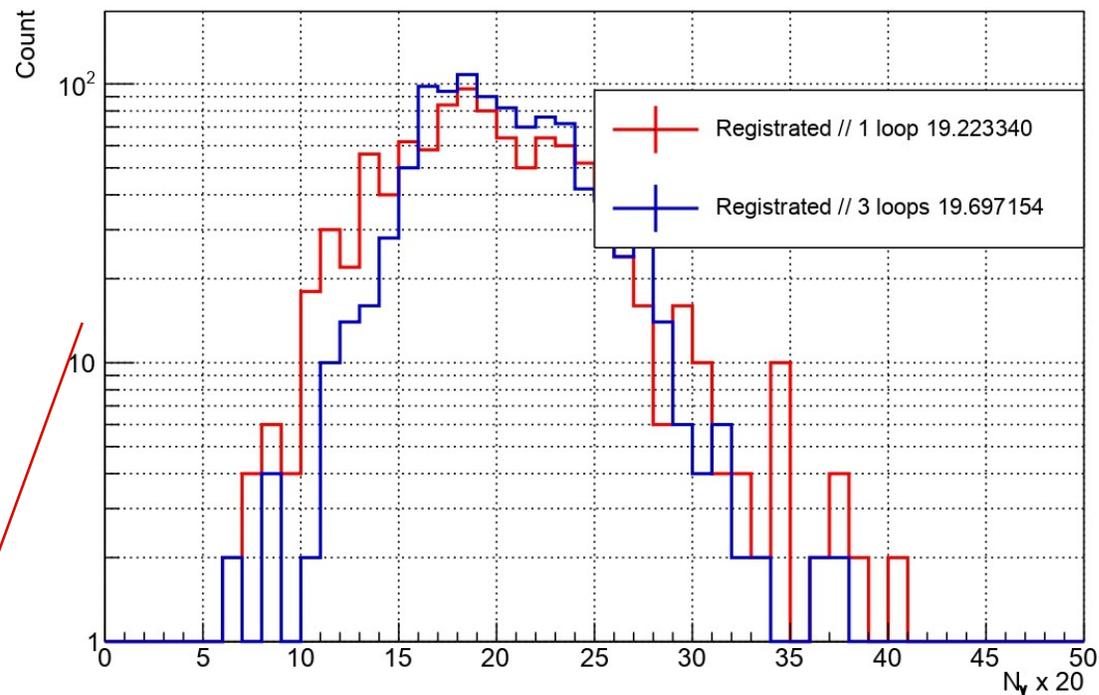
Вывод

Количество витков сильным образом не влияет на число Reg фотонов, но влияет на число WLS

Результаты

[p , 700 MeV, 1000 evt]

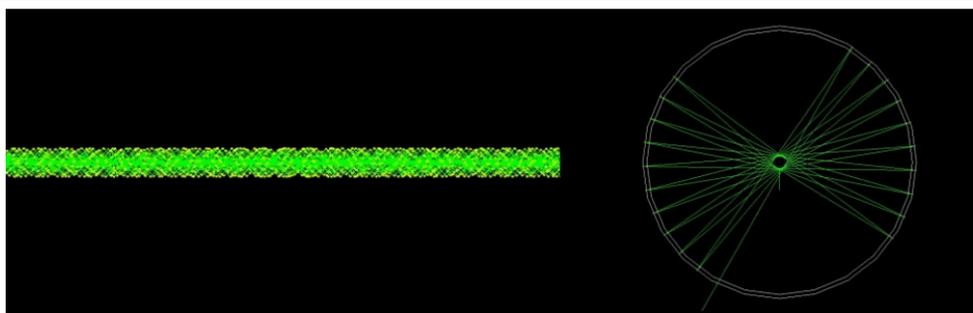
Number of REG photons 1000 events



Задачи:

- Ввести профиль пучка для разыгрывания положения первичной частицы
- Определить причину отсутствия зависимости числа регистрируемых фотонов от количества витков оптоволокна
- Определить метод решения данной проблемы
- Является ли достоверным число генерируемых WLS фотонов

CAD -> G4



Конфигурации прямых отрезков оптоволокна:

- Геометрия через G4Tubs
- CAD -> STL -> CADMesh
- CAD -> STEP -> GDML -> G4Parser

Выводы

- С уточнением геометрии при помощи управляющих параметров при конвертации размер файла увеличивается таким образом, что не помещается в оперативную память -> производить расчеты невозможно
- Метод CADMesh -> G4 не подходит для моделирования подобных структур (оптоволокно в виде спирали)
- Метод GDML -> G4 активно тестируется (на данный момент поведение идентичное первому методу)
- В большинстве публикаций и работ используется внутренние методы G4, но геометрия существенно проще
- **Актуальным остается распределение числа генерируемых WLS фотонов**

Причины расхождений

Два метода переноса геометрии:

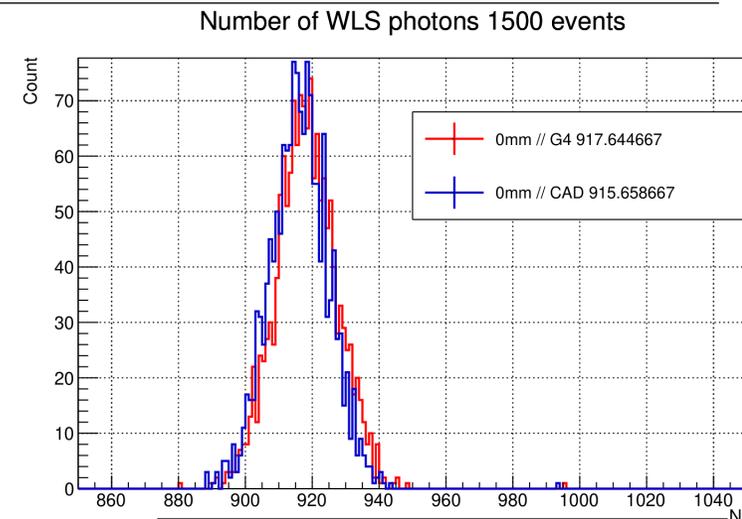
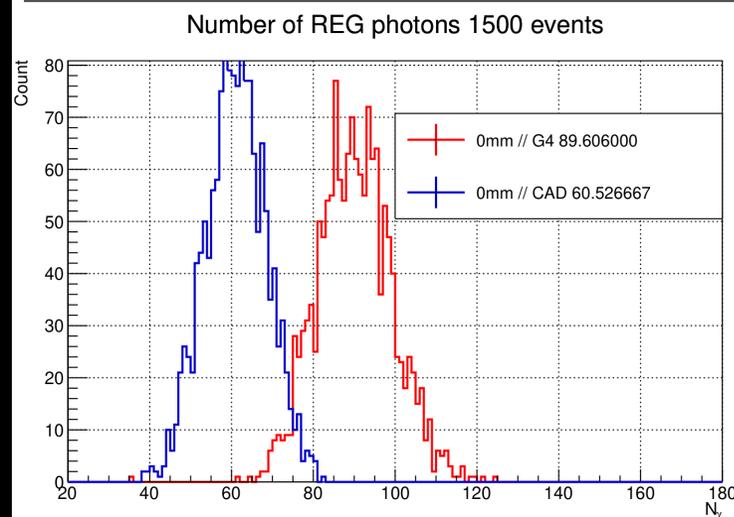
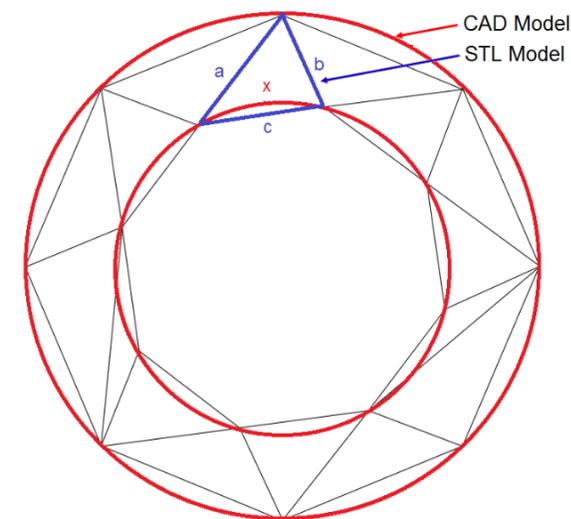
- STL -> G4 (CADMesh)
- STEP/STL -> GDML -> G4Parser

Оба метода используют тесселяцию (триангуляцию).

Из-за отклонения геометрии от окружности при таких подходах WLS фотоны не удерживаются оптоволокном.

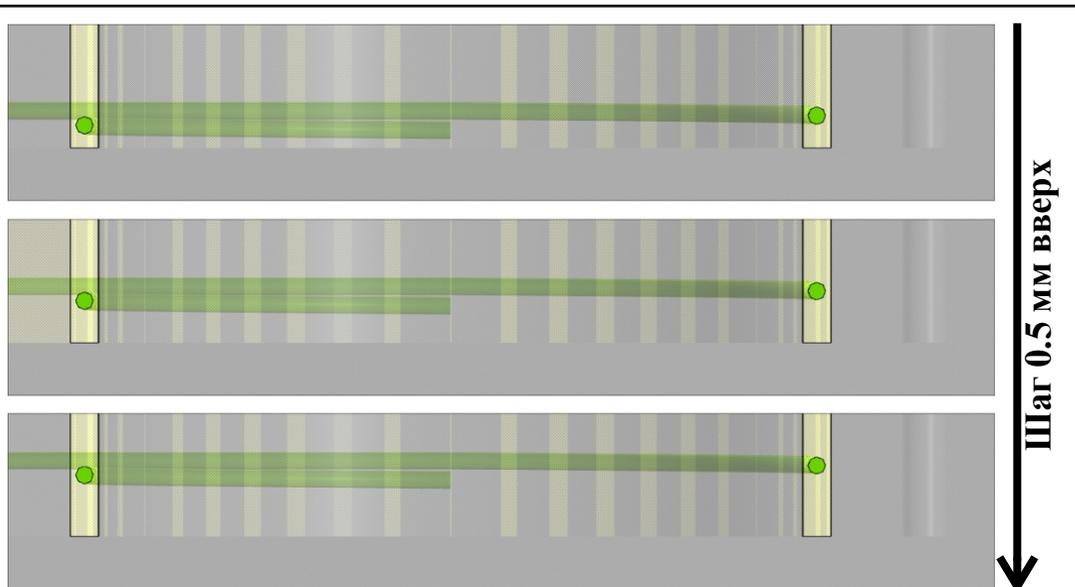
Параметры линейного и углового отклонений при конвертации разительно увеличивают размер файла, что не позволяет производить расчеты

STL (STereoLithography) – Mesh



[gamma, 3.6 eV, 1500 evt]

Глубина залегания оптоволоконна



- Конфигурация положения оптоволоконна: 7 различных уровней с шагом в 0.5 мм начиная с 1 мм от дна 7 мм канавки
- Одна конфигурация глубины канавки: 7 мм
- P, 700 МэВ, пучок направлен в центр

Вывод

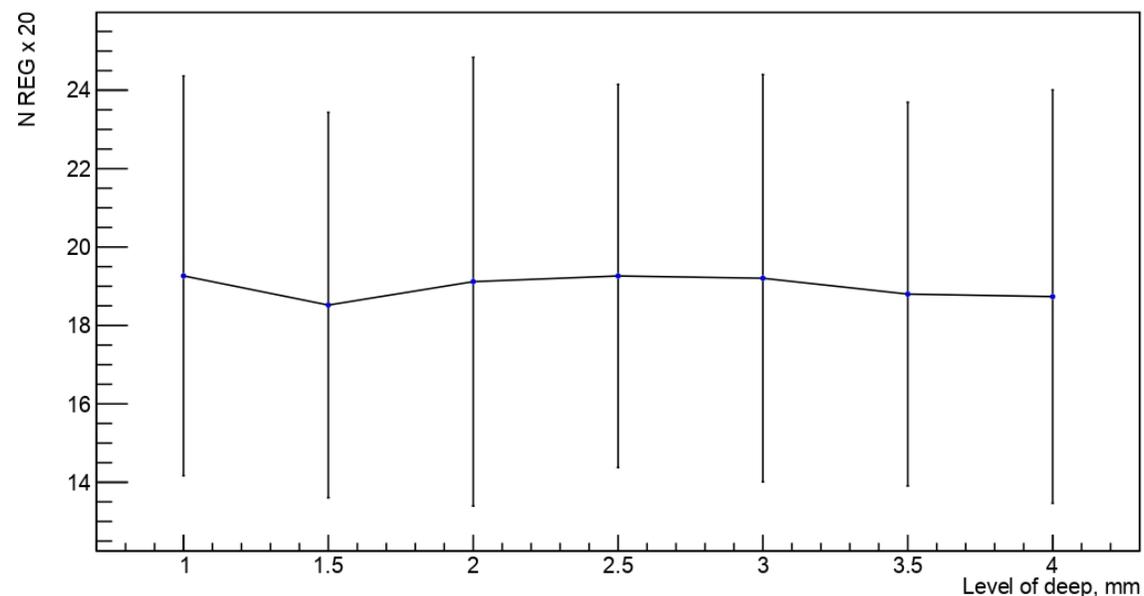
Глубина залегания существенно не влияет на число WLS и Reg

Результаты

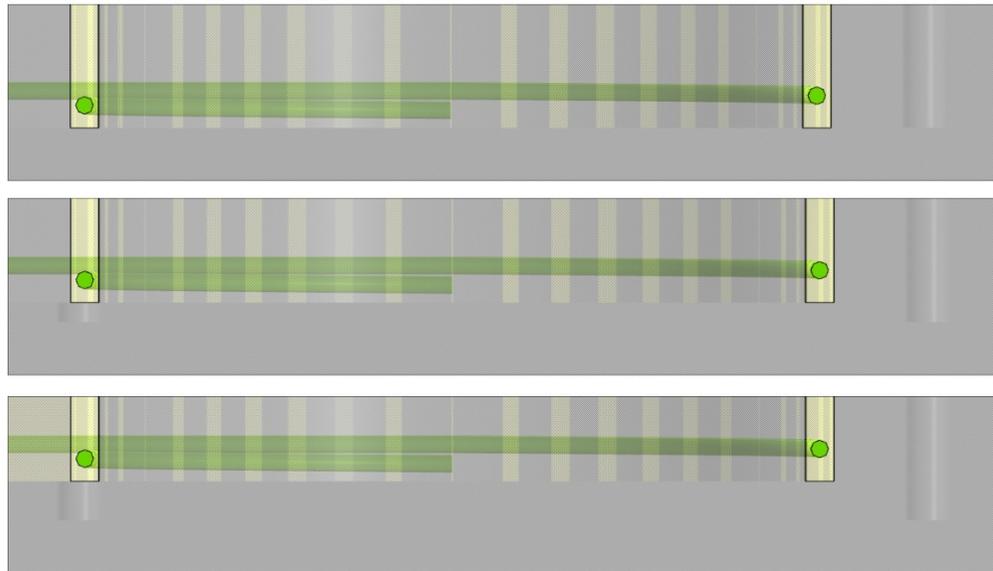
[p, 700 MeV, 1000 evt]

Отступ, мм	Число WLS, x20	Число Региструемых, x20
1	1008.69	19.2651
1.5	991.109	18.5202
2	1017.58	19.1174
2.5	995.403	19.2621
3	990.092	19.204
3.5	988.12	18.8
4	976.831	18.736

Level of Ring Deep VS Number of PMT Registered



Глубина канала для оптоволоконна



Глубина канавки, мм	Число SC, x20	Число WLS, x20	Число REG, x20
4	1432.81	972.101	18.4094
5.5	1414.72	962.013	17.5168
7	1435.04	976.831	18.736

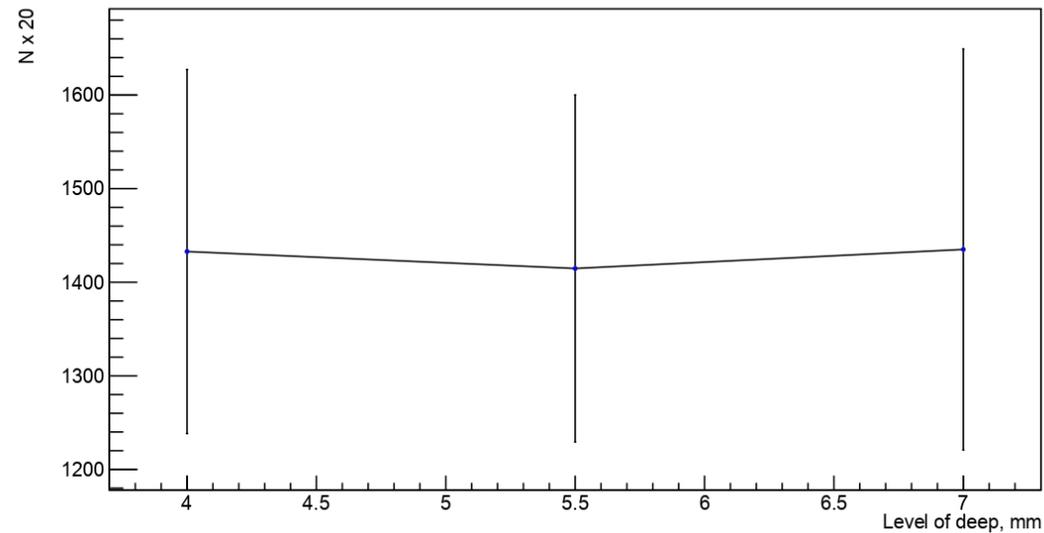
- Конфигурация положения оптоволоконна: на глубине 2 мм расположена середина начала витка
- Три различных конфигурации глубины канавки: 4, 5.5, 7 мм
- P, 700 МэВ, пучок направлен в центр

Число SC, WLS и Reg фотонов не зависит от глубины канавки.

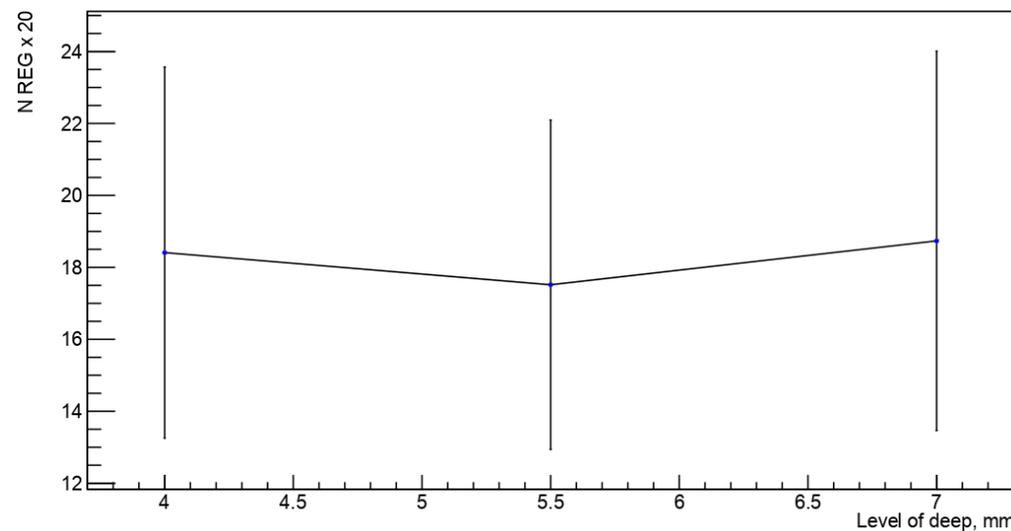
Результаты

[p, 700 MeV, 1000 evt]

Level of Glue Deep VS Number of SC



Level of Glue Deep VS Number of PMT Registered

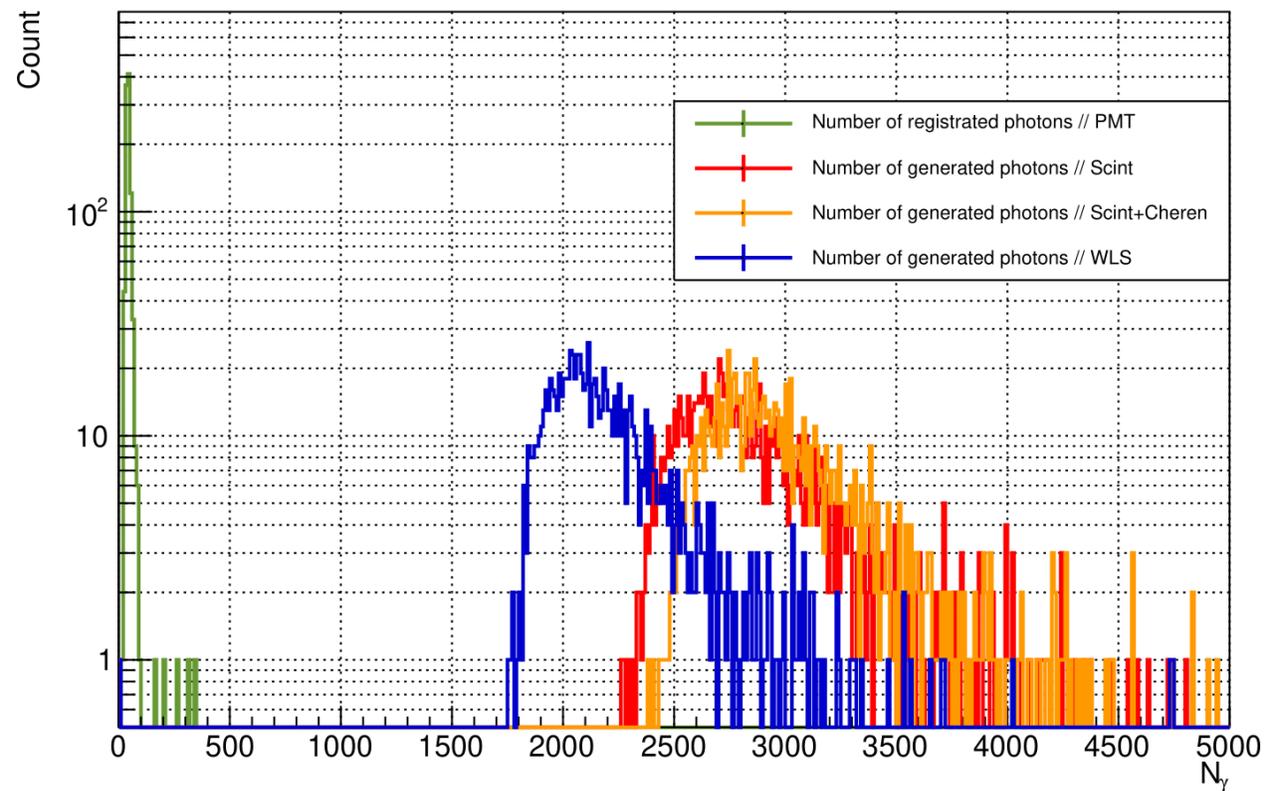


Распределение по числу генерируемых фотонов для нулевого элемента прототипа

[p, 700 MeV, 1000 evt]

Элемент 0

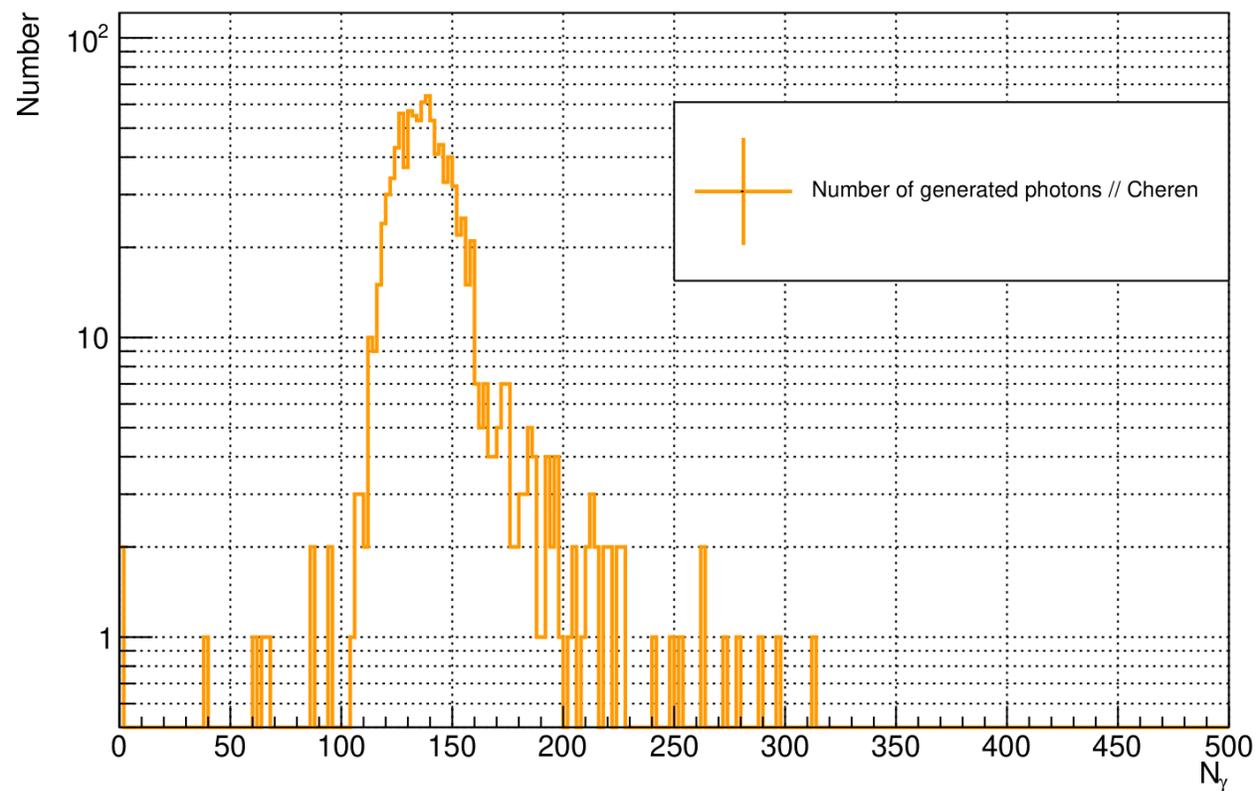
Number of photons: 1000 events, p+ 700 MeV, single tile



За одно событие генерируется:

- ~ 27000 сцинтилляционных фотонов
- ~ 140 фотонов Черенковского излучения
- ~ 22000 переизлученных фотонов в объеме оптоволокну

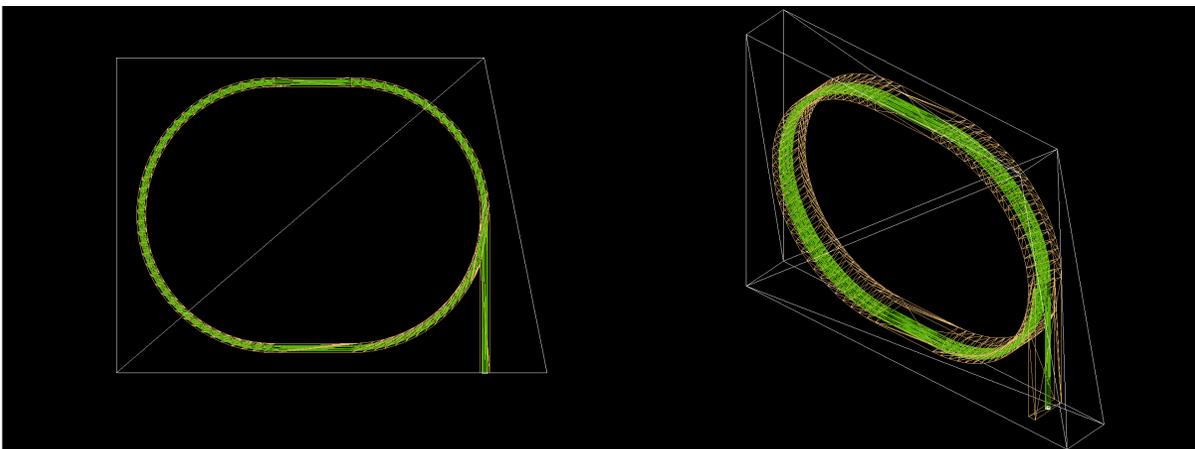
Number of photons: 1000 events, p+ 700 MeV, single tile



- Отношение генерируемых **Scint** к **Cheren**: **192:1**
- Около **82%** генерируемых фотонов захватываются и переизлучаются оптоволокну

Результаты. Модели элементов

Визуализация четвертого элемента прототипа BBC в GEANT4



- Каждый элемент прототипа смоделирован в КОМПАС-3D, перенесен в G4 с помощью библиотеки CADMesh
- Для моделирования использовалась геометрия, приближенная к реальной

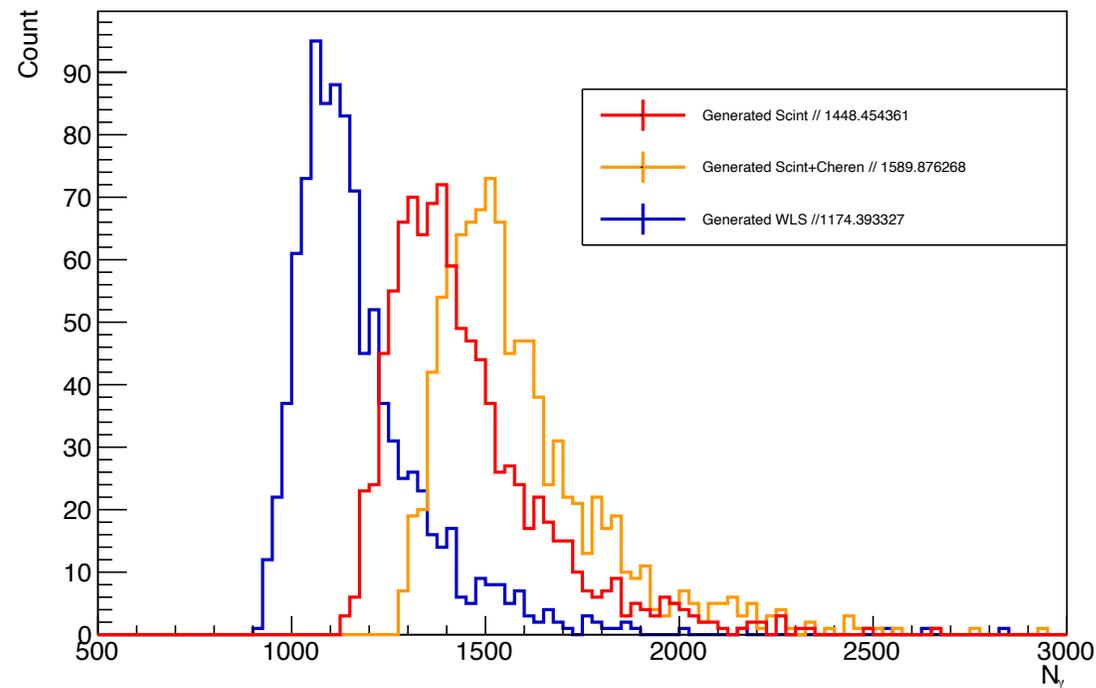
Таблица соотношения объемов сцинтиллятора и оптоволокна для каждого элемента прототипа

Номер тайла	Объем сцинтиллятора, мм ³	Объем волокна, мм ³	Соотношение
0	28334.106	379.404	74.680
1	19965.334	241.781	82.576
2	26138.290	345.951	75.554
3	32311.244	386.800	83.534
4	38484.200	430.063	89.485

[p, 700 MeV, 1000 evt]

Распределение по числу фотонов, генерируемых на разных этапах моделирования (элемент 1)

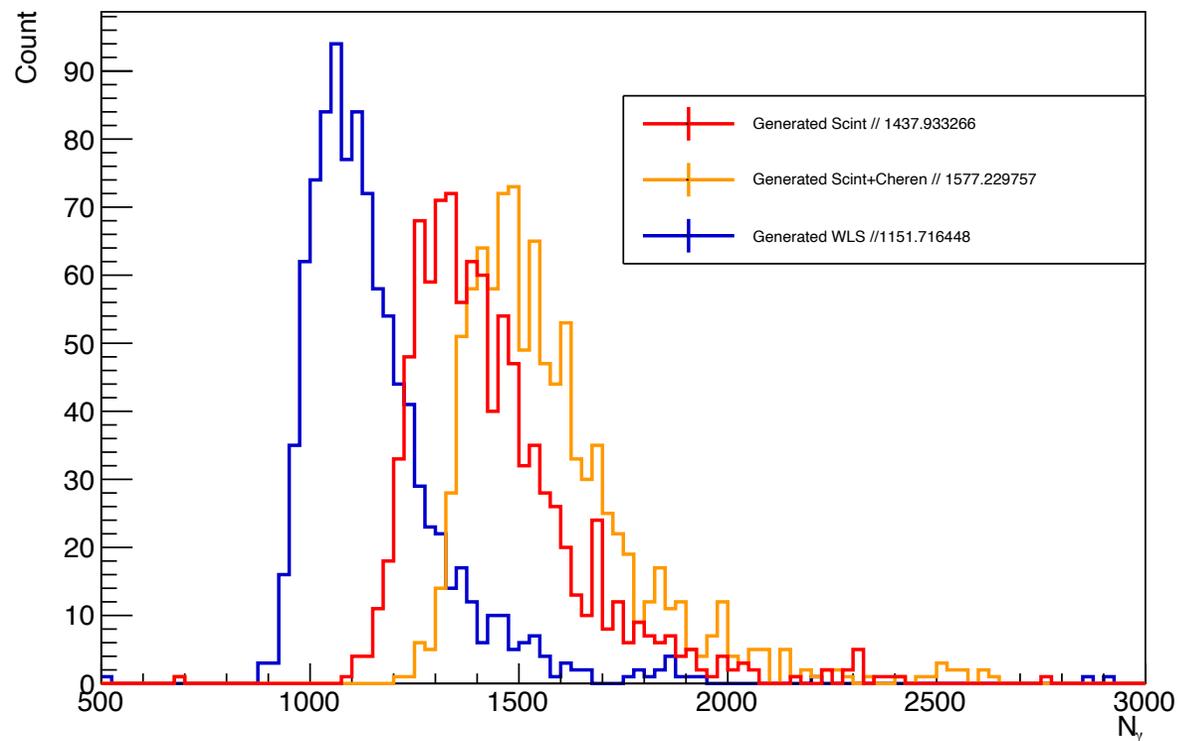
Number of photons 1000 events



Распределение по числу фотонов, генерируемых на разных этапах моделирования

Элемент 2

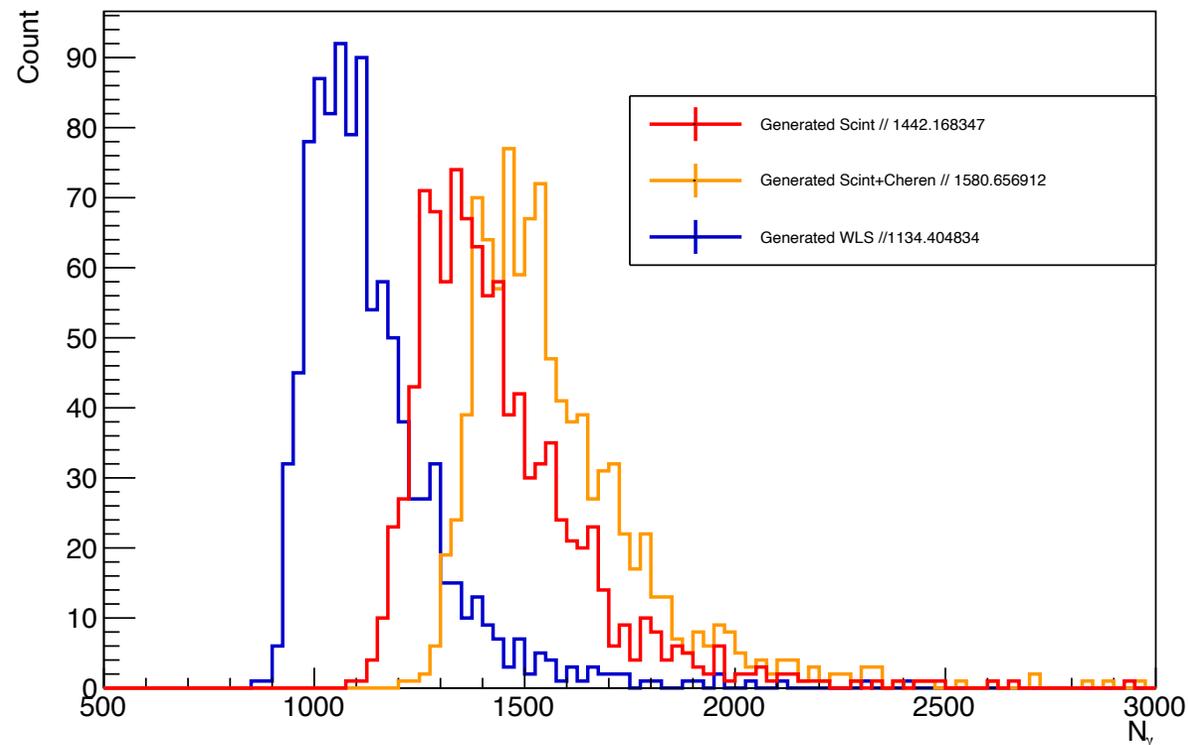
Number of photons 1000 events



Элемент 4

[p, 700 MeV, 1000 evt]

Number of photons 1000 events



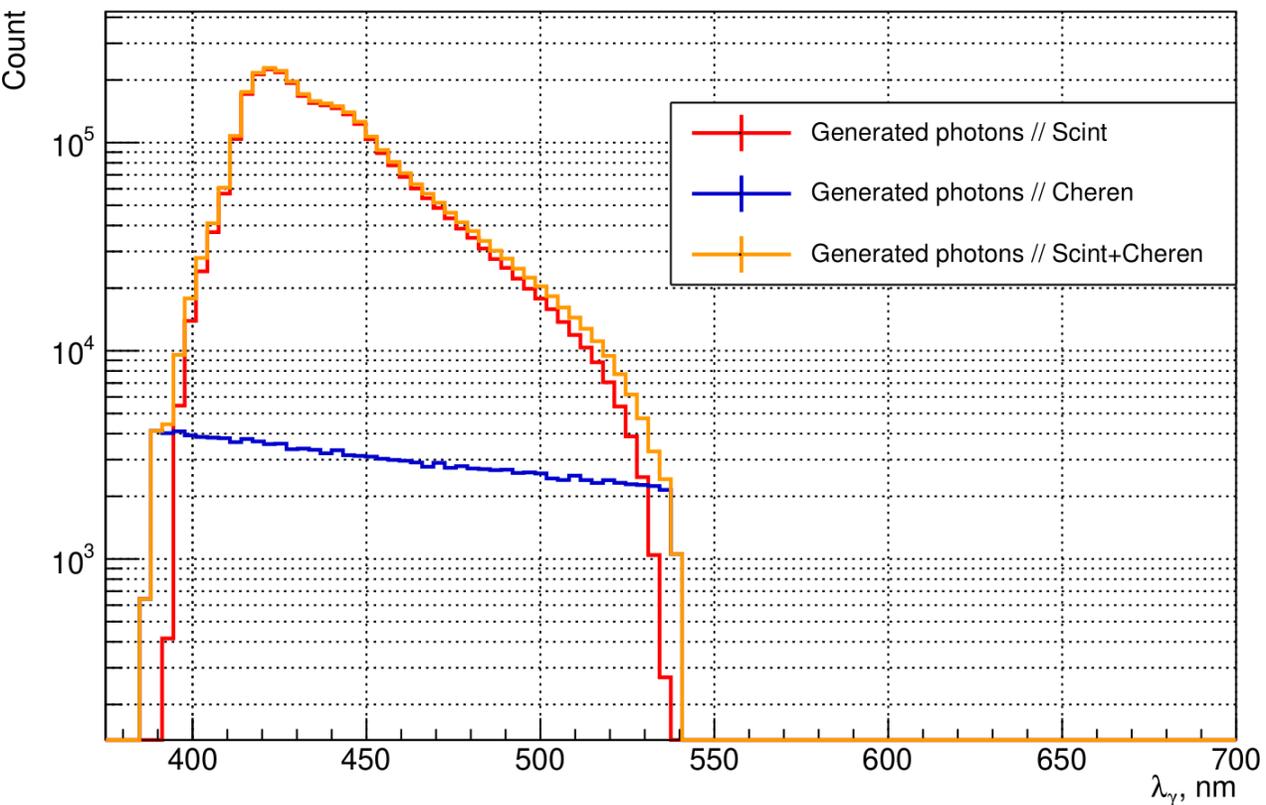
При использовании подхода с применением точной геометрии для оценки числа переизлучаемых WLS фотонов возможно:

- Оценка числа фотонов на выходе из элемента детектора с привязкой к экспериментальным данным
- Оценка оптимальной формы укладки оптоволокон по числу переизлучаемых фотонов

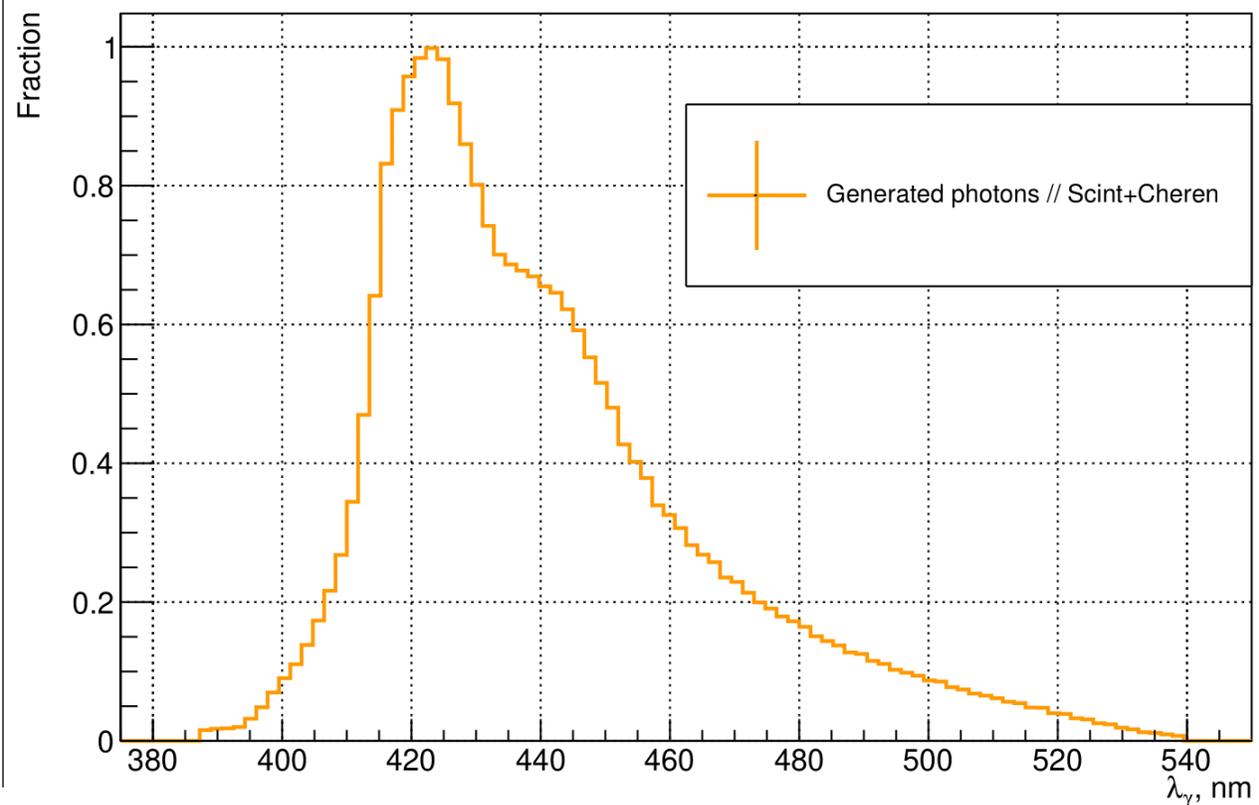
Энергетический спектр генерируемых фотонов

[p, 700 MeV, 1000 evt]

Wavelength distribution // Generated: 1000 events, p+ 700 MeV, single tile



Wavelength distribution // Generated: 1000 events, p+ 700 MeV, single tile



Энергетический спектр генерируемых фотонов полностью определяется параметрами задаваемыми при описании соответствующих материалов – является характеристикой сцинтиллятора